

NUMÉRO D'ORDRE :

610

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Pour obtenir le titre d'Ingénieur-Docteur

par

Jean BURACCO

Ingénieur E. S. M. E.

Licencié ès-Sciences

1^{re} THÈSE : *Etude du contournement d'un isolateur lisse vertical dans le brouillard.*

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 12 Juin 1959 devant la Commission d'Examen.

M. PAUTHENIER : Président.

MM. QUENEY
BRICARD } Examineurs



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556006_0010

NUMÉRO D'ORDRE :

610

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Pour obtenir le titre d'Ingénieur-Docteur

par

Jean BURACCO

Ingénieur E. S. M. E.

Licencié ès-Sciences

1^{re} THÈSE : *Etude du contournement d'un isolateur lisse vertical dans le brouillard.*

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 12 Juin 1959 devant la Commission d'Examen.

M. PAUTHENIER : Président.

MM. QUENEY }
BRICARD } Examineurs



A Monsieur BRICARD

Je remercie Monsieur PAUTHENIER,
Directeur du Laboratoire H. T. de
Bellevue pour sa bienveillance et ses
conseils, Monsieur COCHET pour son
amical soutien, Monsieur DUBOIS
pour son aimable accueil et tout le
Personnel du Laboratoire H. T. de
Bellevue pour son dévouement.

A mes Parents,

A ma Femme.

ÉTUDE DU CONTOURNEMENT D'UN ISOLATEUR LISSE VERTICAL DANS LE BROUILLARD

RÉSUMÉ

Des essais ont été effectués aux Laboratoires du C. N. R. S. à Bellevue afin d'étudier le mécanisme de contournement d'un isolateur lisse vertical baignant dans le brouillard.

Nous avons pu montrer que le phénomène de contournement est précédé par une captation électrique des gouttelettes neutres près de la Haute Tension. Cette phase préliminaire se termine par une émission d'ions accompagnée de phénomènes lumineux. Des aigrettes s'y superposent et des gouttes chargées se déposent en formant une pellicule continue qui déclenche l'arc final.

D'autres essais nous ont permis de mettre en évidence la proportionnalité de la tension de contournement avec la distance d'éclatement pour une densité de brouillard donnée. Puis, pour une longueur fixe, nous avons étudié la variation de la tension de contournement en fonction de la densité de brouillard.

BUT DES ESSAIS

Les isolateurs HT présentent, en service, des phénomènes de contournement lorsque les éléments météorologiques sont défavorables et en particulier, lorsqu'il se produit sur eux des dépôts de rosée ou de brouillard (Réf. 1 à 7).

Les auteurs qui ont étudié ces phénomènes ont établi des statistiques montrant l'importance des conditions météorologiques et mettant ainsi en valeur le rôle prépondérant des gouttelettes. Mais les isolateurs mis en cause sont de formes compliquées, leur surface était recouverte de poussières ou de dépôts chimiques de telle sorte qu'il était difficile d'expliquer clairement le mécanisme du contournement.

Les travaux de W. ESTORFF et H. von CRON (8) et F. OBENAU (9) sur les contournements dûs aux dépôts superficiels expliquent les divers phénomènes lumineux qui prennent naissance lorsqu'on applique une d.d.p. aux extrémités d'une plaque isolante recouverte de gouttelettes.

Ils ont montré que les faibles valeurs auxquelles peuvent descendre la tension de contournement d'un isolateur H. T. dont la surface est polluée ne peuvent plus être expliquées par le seul effet du champ électrique mais, que l'arc final se produit toujours par l'intermédiaire d'un "pont d'amorçage" existant dans la couche de corps étrangers déposés sur l'isolateur ou d'un "canal de courant" se formant entre pièces sous tension shuntant de longs cheminements par le "mécanisme du foyer incandescent mobile". Dans ce phénomène, l'ionisation thermique de la couche de corps étrangers occupe le premier plan avant l'ionisation par choc dans l'air.

PAUTHENIER et COCHET (10, 11 et 12) ont étudié, pour une tension continue, différentes méthodes de détermination, soit mathématique, soit graphique, du coefficient de captation d'un obstacle cylindrique électrisé.

Les essais que nous avons effectués à Bellevue ont pour but d'expliquer le mécanisme du contournement en même temps que la captation des gouttelettes.

CHAPITRE I

DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

A) CHAMBRE A BROUILLARD

1) *Production et caractérisation du brouillard.*

Le brouillard est produit par un système de 3 pulvérisateurs à air comprimé. L'eau est aspirée par dépression dans un bac à l'aide d'un système tubulaire arrivant dans le corps de l'appareil. L'ajutage de sortie est réglable par une aiguille mobile.

On peut obtenir, en faisant varier la pression d'air et la position de l'aiguille, une infinité de brouillards tant au point de vue densité qu'au point de vue grosseur des gouttes. La hauteur de l'eau dans le bac de verre doit être maintenue constante durant tout le débit pour avoir une production homogène. Nous avons recherché en jouant sur le réglage de l'aiguille mobile à obtenir des grosseurs de gouttes semblables à celles des brouillards naturels. Les variations de pression d'air ne sont utilisées que pour obtenir différentes densités de brouillard. Nous avons porté (courbes I) les allures des courbes de granulométrie suivant les densités de brouillard. Grâce aux réglages nous avons pu obtenir que les gouttes les plus fines correspondent aux densités les plus faibles et que les grosses gouttes correspondent aux brouillards très denses (par exemple maximum de gouttes de 7 microns de diamètre pour un brouillard de 0,96 g. d'eau par m³ et maximum de gouttes de 13 microns pour 6,12 g/m³).

Les gouttelettes ainsi formées sont précipitées du sommet d'une pièce au préalable humidifiée jusqu'à saturation pour que l'évaporation y soit pratiquement nulle. Elles tombent d'une hauteur de 4 mètres sur une surface de 4 m. $\times$ 4 m.

La stabilité du brouillard est contrôlée par un système de 2 cellules photo-électriques. Un premier système comprend un projecteur et une cellule, dite de référence, réglable par diaphragme, et qui reçoit une partie du flux lumineux à travers de l'air sec. La seconde cellule, dite de mesure, est placée face au projecteur de l'autre côté de la chambre à brouillard; elle reçoit le flux lumineux à travers le mélange air-gouttelettes. Ces 2 cellules sont montées en opposition et un potentiomètre permet le réglage d'un galvanomètre. L'équilibre est alors réalisé pour un brouillard donné. Les fluctuations du courant indiquent les variations de densité du brouillard.

Pour caractériser le brouillard, il faut connaître les dimensions des gouttes ainsi que leur répartition en nombre. Nous avons essayé 4 appareillages différents dont nous avons comparé les résultats :

a) "La captation par fils" (DESSENS) - (photo n° 1) est effectuée au moyen de raquettes de petites dimensions sur lesquelles on enroule un fil tissé par une araignée. Le diamètre du fil varie entre 1/10 et 1 micron. La raquette ainsi traitée est promenée dans le brouillard à étudier de telle sorte que les gouttes s'accrochent sur les fils et peuvent alors être photographiées sous microscope. Il faut, lors du dépouillement des résultats, tenir compte d'un coefficient de captation proportionnel au diamètre des fils. De plus, il est nécessaire d'opérer l'examen en atmosphère saturée pour éviter l'évaporation. Cette précaution obligatoire demande que le fil d'araignée soit très propre car la moindre impureté joue le rôle d'un noyau de condensation et provoque l'apparition d'une gouttelette parasite.

b) La captation électrostatique (PAUTHENIER et DEMON) - (Photo n° 2).

L'appareil comporte un support soutenant 2 fils distants de 1 cm. et entre lesquels on établit une d. d. p. continue d'environ 6.000 volts. Il se produit alors une ionisation de

l'air ambiant. Les gouttelettes qui passent à proximité se chargent et sont précipitées dans un récipient d'huile relié à la terre. On prélève, après mise sous tension, quelques gouttes d'huile que l'on examine sous microscope.

Cette méthode demande une assez grande rapidité d'exécution pour éviter l'écrasement des gouttes captées sur le fond de la plaque de verre par suite de la différence de densité eau-huile. De plus, la tension superficielle de l'eau étant fortement diminuée dans l'huile, il se produit des coalescences.

c) Le Nébulo-granulomètre comporte un système optique permettant d'obtenir un faisceau lumineux très fin dans lequel passe un certain débit de brouillard amené par aspiration. Le trajet des gouttelettes est photographié directement. Chaque goutte est représentée par une traînée lumineuse composée de 2 ou 4 traits parallèles suivant sa grosseur. La distance entre ces traits donne le diamètre de la gouttelette.

d) L'Impacteur en cascade (photo n° 3) se compose de 4 cylindres dans lesquels on peut introduire 4 plaques de verre traitées au préalable par de l'encre séchée. Le premier cylindre comporte une ouverture par laquelle on aspire le brouillard et se termine par un ajutage qui débouche perpendiculairement à la face de la plaque de verre du deuxième cylindre. Les second et troisième cylindres possèdent aussi des ajutages qui se terminent dans le cylindre qui suit. Le quatrième cylindre est branché directement sur le système d'aspiration. Les gouttelettes entraînées se déposent sur les plaques de verre où une discrimination se produit, les ajutages étant de plus en plus fins du premier au quatrième. L'impact d'une goutte se traduit par une tache auréolée (photographies 4-5-6).

La dimension de cette tache donne la grosseur de la goutte avec un coefficient de correction.

Cet appareil est très maniable et d'emploi relativement aisé. On l'a utilisé pour toutes les mesures effectuées dans la chambre à brouillard.

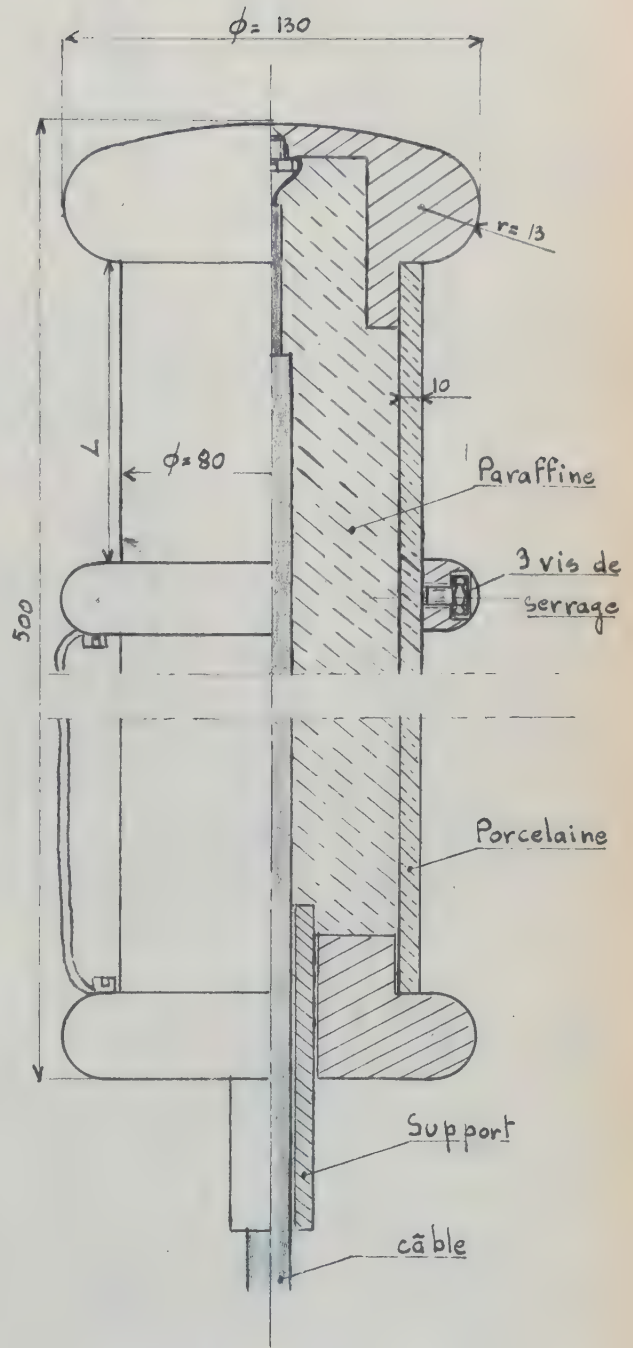
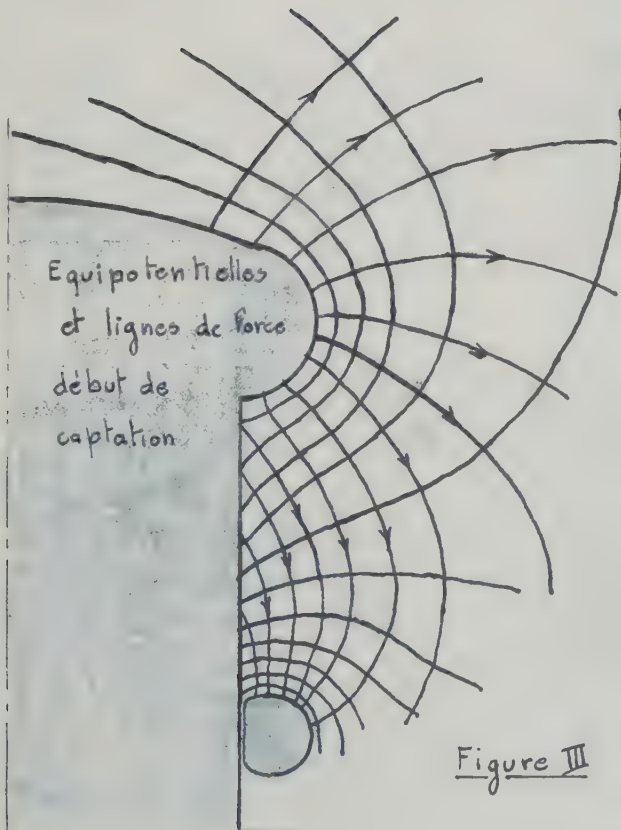
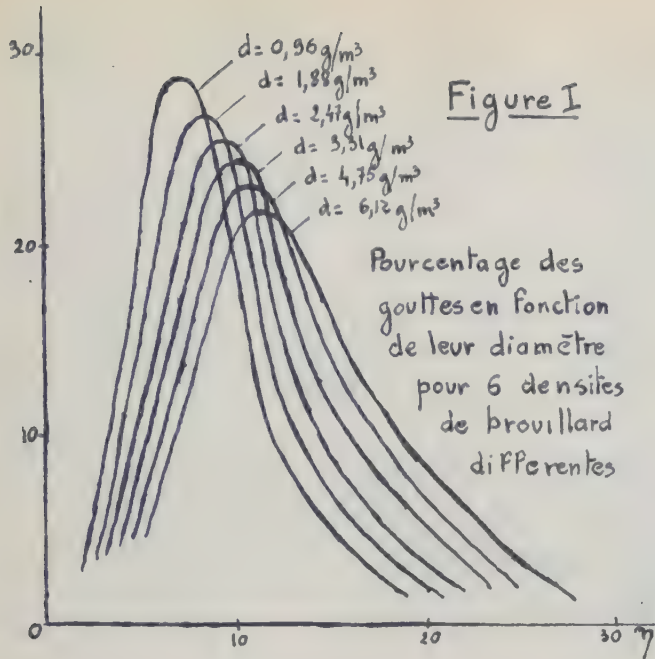
Des études comparatives ont été effectuées en prélevant du brouillard au même endroit et au même instant, à l'aide des 4 appareils. L'accord assez bon pour les trois premières méthodes, devient remarquable pour les deux dernières.

Pour déterminer la masse d'eau condensée par mètre cube on prélève le brouillard dans une éprouvette tubulaire tarée contenant du coton de verre (l'aspiration doit demeurer assez lente pour éviter les arrachements de gouttelettes). L'éprouvette tarée est pesée au milligramme près, avant et après l'absorption des gouttes.

2) Constitution et propriétés du brouillard.

Comme nous l'avons vu, la stabilité du brouillard peut être contrôlée grâce à un système de cellules photo-électriques. On a constaté, à Bellevue, que le brouillard peut être considéré comme stable après 1/2 heure de débit des pulvérisateurs à condition que les murs aient été convenablement humidifiés au préalable. Il se produit alors un équilibre entre les gouttelettes qui tombent et celles qui disparaissent sur le sol. D'autre part, on a étudié l'homogénéité du brouillard grâce à un transmissiomètre à cellules photo-électrique dont le chemin optique était de 12 mètres. Le brouillard peut être considéré comme homogène dans toute sa couche sur une hauteur de 3 mètres à partir du sol. L'isolateur a donc été placé à une hauteur de 2 mètres au centre de la salle.

Lors des essais électriques, nous n'avons utilisé que 6 valeurs de la pression d'air dans les pulvérisateurs qui correspondent à 6 brouillards différents, tant au point de vue granulométrie qu'au point de vue masse d'eau condensée. A chaque réglage on a effectué des



prélèvements à l'impacteur en cascade et avec l'éprouvette tarée (figure I).

Par addition de bleu de méthylène à l'eau des pulvérisateurs, on obtient une coloration des gouttelettes. On peut ainsi repérer le dépôt laissé par les gouttes sur un support même après évaporation. Pour étudier la turbulence, nous avons placé verticalement et horizontalement des feuilles de papier photographique au sein du brouillard et en particulier près de l'isolateur. Un manchon entoure la porcelaine tandis qu'un papier repose horizontalement sur le chapeau. Lors de la stabilité du brouillard, on remarque que le dépôt de gouttelettes est intense sur le papier horizontal (une pellicule d'eau peut s'y former après 10 minutes de pose) il est minime et presque négligeable sur le manchon vertical (même après 15 minutes de pose). Donc la trajectoire des gouttes se fait suivant une verticale. La composante horizontale est pratiquement nulle.

B) INSTALLATION ÉLECTRIQUE

Pour éviter le dépôt dû à la chute des gouttelettes, nous avons utilisé un isolateur vertical protégé. Le corps de l'isolateur se compose d'un cylindre de porcelaine lisse. L'isolateur (voir figure II) se présente comme un cylindre vertical terminé à son extrémité supérieure par un chapeau métallique connecté à la Haute Tension. Une bague reliée à la terre coulisse sur le corps permettant de faire varier facilement la longueur de contournement. L'ensemble repose sur un support de telle sorte que le chapeau soit à deux mètres du sol.

En courant continu la source est un système diode-condensateur alimenté par un transformateur 110-40.000 Volts, réglé par rhéostat. Un voltmètre électrostatique est branché entre la sortie Haute Tension et la bague de l'isolateur reliée à la terre.

Nous avons aussi fait des essais en courant alternatif, mais les conditions expérimentales ne nous ont malheureusement pas permis de dépasser 15 KV.

CHAPITRE II

LE PHÉNOMÈNE DE CONTOURNEMENT EN COURANT CONTINU

A) PHÉNOMÈNES OBSERVÉS LORS DE LA MISE SOUS TENSION

La distance entre bagues étant de 8 cm. et la surpression d'air amenant le brouillard de 1 kg. cm², nous avons fait croître la tension à partir de 0 et observé les phénomènes lumineux qui se produisent sur la porcelaine. Un oscillographe permettait d'obtenir l'allure du courant en fonction du temps.

1) *Emission d'ions.*

La tension négative est élevée lentement et progressivement à partir de 0. Dès 15 KV une lueur bleue apparaît par endroits sur la porcelaine. Elle débute par une fine traînée lumineuse située à 4 ou 5 cm. sous le chapeau. La tension augmentant, le phénomène prend de l'ampleur et la plage d'émission s'élargit, son maximum d'intensité étant dirigé vers la terre. Un courant de faible intensité (de l'ordre de quelques mA) et caractéristique d'émission d'ions est visible à l'oscillographe. Ce courant s'accroît avec la tension. Aux environs de 20 KV, une seconde émission rougeâtre prend naissance à 1 ou 2 cm. au-dessus de l'anneau à la terre.

2) *Aigrettes.*

La tension s'accroissant toujours, les deux émissions qui se font face augmentent d'intensité et se dilatent. Aux environs de 22 KV, une aigrette apparaît entre les deux régions les plus intenses des zones d'émission. Cette aigrette est un trait lumineux dont la base, située sur l'émission du côté de la terre est stable et dont l'extrémité se déplace rapidement sur l'extrémité inférieure de la zone ionisée sous le chapeau HT. Il se produit un mouvement rapide en éventail. Avec notre montage une chute de tension accompagne malheureusement le phénomène (jusqu'à 30 % environ de la tension initiale). Un courant de quelques dizaines de milliampères apparaît sur l'oscillographe.

Si la chute de tension devient très importante l'aigrette s'éteint, la tension revient à sa valeur initiale et une nouvelle aigrette apparaît quelques secondes après. Ce phénomène étant dû au trop faible débit de notre système diode-condensateur.

Le phénomène s'intensifie lorsque l'on fait croître la tension.

3) *Contournement.*

Aux environs de 28 KV, les aigrettes et les émissions d'ions sont très intenses et les chutes de tensions très importantes. Finalement, lorsque la tension atteint une valeur suffisante, il se produit un claquage sec accompagné d'une lueur très intense (photo n° 7). Le contournement se produit et l'oscillographe indique un courant de quelques centaines de milliampères.

B) ETUDE A L'AIDE DU BLEU DE MÉTHYLÈNE.

Nous avons vu que les gouttes ont en grande majorité un mouvement de chute vertical lorsqu'il y a stabilité du brouillard et en l'absence de tension sur l'isolateur.

Pour examiner le début du phénomène, nous entourons la porcelaine d'un papier photographique et, si l'on fait croître la tension à partir de 0, on remarque que :

— Un apport de gouttelettes se produit à partir de la haute tension avec maximum de densité près du chapeau.

— Le phénomène lumineux d'émission se produit à partir de l'extrémité inférieure d'une pellicule d'eau qui descend de la haute tension (5 cm. environ entre chapeau et émission).

— Cette émission s'accompagne d'un apport de gouttelettes vers la partie de l'isolateur immédiatement au-dessus de l'anneau à la terre (photo n° 8).

— On observe aussi dans ce cas une seconde émission lumineuse qui part de l'extrémité d'une pellicule d'eau et qui remonte de l'anneau à la terre vers la haute tension (sur une distance de 1 cm.).

— Lorsque les aigrettes se produisent entre les deux régions d'émissions, il n'y a plus de gouttelettes qui se posent entre elles. Par contre, l'extrémité supérieure de la couche qui part de la terre et la partie de l'isolateur voisine de l'aigrette reçoivent de nombreuses gouttelettes.

— Le contournement suit une ligne où les gouttelettes sont suffisamment nombreuses pour former un film ininterrompu entre la terre et la haute tension.

C) ETUDE DU CONTOURNEMENT.

D) CAPTATION DES GOUTTELETTES NEUTRES.

1) Mouvement d'une particule au voisinage de la haute tension.

En l'absence de tension sur l'isolateur une gouttelette de rayon r qui tombe avec la vitesse V dans le brouillard stable obéit à la loi de STOCKES. La résistance de l'air s'écrit

$$R = 6 \pi r \eta V$$

$$\eta \text{ coefficient de viscosité de l'air} = 1,73 \cdot 10^{-4} \text{ cgs}$$

La vitesse limite de chute V_c est rapidement atteinte de sorte que près de l'isolateur les gouttes ont un mouvement de chute vertical de vitesse faible (par exemple pour $r = 10^{-3}$ cm $V_c = 1,26$ cm/sec)

Considérons une gouttelette en suspension dans l'air. Elle se comporte comme une sphère rigide de diamètre d , de masse spécifique ρ , de volume τ et de permittivité ϵ

En un point M quelconque près de la haute tension soit $\vec{V}$ la vitesse de la particule à l'instant t

Les forces appliquées à la gouttelette en M sont:

$$\text{La force d'inertie: } - \tau \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

$$\text{La résistance de l'air: } - 6 \pi r \eta \vec{V} = - 3 \pi d \eta \vec{V}$$

$$\text{La force de pesanteur: } \rho \tau \vec{g}$$

$$\text{La force électrique: } - \lambda \left(\frac{d}{2}\right)^3 \vec{E} \frac{\partial E}{\partial n} \text{ avec } \lambda = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}$$

En supposant que l'action mutuelle des gouttes soit négligeable, cette force électrique est dirigée vers les champs les plus intenses.

D'où l'équation générale qui définit le mouvement d'une gouttelette neutre près de la haute tension

$$- \tau \rho \frac{d\vec{V}}{dt} - 3 \pi d \eta \vec{V} + \rho \tau \vec{g} - \lambda \left(\frac{d}{2}\right)^3 \vec{E} \frac{\partial E}{\partial n} = 0$$

Si la force électrique est faible (E ou $\frac{\partial E}{\partial n}$ très petits) tout se passe comme si la goutte tombait verticalement avec vitesse limite de chute.

Lorsque la force électrique n'est plus négligeable, la trajectoire des gouttelettes s'incurve vers les champs les plus internes et ceci d'autant plus que E et $\frac{\partial E}{\partial n}$ sont grands.

2) *Captation des gouttes par le chapeau.*

D'après l'allure de l'isolateur (voir figure II), les équipotentiellees et les lignes de force ont l'allure indiquée sur la figure III. On remarque alors que, pour un potentiel V donné, les gouttelettes vont être attirées sur le haut de la porcelaine là où le champ électrique est maximum et sur l'anneau à la terre. Au fur et à mesure que l'on augmente la Haute Tension les équipotentiellees se resserrent et les forces électriques s'intensifient. Finalement, la densité des gouttes captées sur le haut de l'isolateur, immédiatement sous le chapeau H. T., sera telle qu'il se formera une pellicule d'eau.

3) *Captation des gouttes par l'ensemble chapeau + pellicule d'eau.*

La pellicule d'eau qui vient de se former sous le chapeau est alors portée au potentiel Haute Tension. Il se produit un véritable report de la Haute Tension jusqu'à son extrémité inférieure. Les équipotentiellees et les lignes de force se déforment (figure IV). D'autre part, comme la tension est toujours constamment accrue, ces courbes se resserrent et la force électrique augmente. D'après l'allure des lignes de force on voit que les gouttelettes continuent à être entraînées sur l'isolateur avec une intensité accrue.

Finalement la pellicule d'eau qui se forme à partir de la Haute Tension descend vers la terre, sous les actions conjuguées de la pesanteur et de l'attraction électrostatique. La captation électrostatique ne provoque aucun passage de courant.

II) **EMISSIONS D'IONS PAR L'EXTRÉMITÉ INFÉRIEURE DE LA PELLICULE D'EAU. CAPTATION des GOUTTELETTES ELECTRISÉES.**

Continuant à faire croître la tension, le champ électrique à l'extrémité de la pellicule d'eau devient suffisant pour arracher des ions sur l'arête inférieure de la pellicule précédente (NOLAN et O'KLEEF). Les gouttelettes de brouillard au voisinage de l'émission se chargent d'ions négatifs et sont repoussées vers l'anneau à la terre suivant les lignes de force (voir figure IV). La progression de la pellicule d'eau vers la terre est pratiquement arrêtée d'autant plus que l'arête liquide qui émet se pulvérise. Les gouttelettes neutres continuent d'être attirées vers les potentiels croissants, mais dès qu'elles se chargent d'ions, elles sont repoussées vers l'anneau à la terre où elles se déposent et amorcent finalement une seconde pellicule d'eau qui remonte sur la porcelaine par attraction électrostatique en même temps que par l'arrivée de gouttelettes chargées sur la gaine d'eau.

III) **PHÉNOMÈNE D'ÉMISSION SIMULTANÉE D'IONS PAR LES DEUX PELLICULES D'EAU.**

La distance entre les deux pellicules diminue, le champ électrique s'accroît sur l'extrémité supérieure de la pellicule à la terre. Il va devenir suffisant pour arracher des ions + sur son arête. Une seconde émission, positive celle-ci, débute entre les deux pellicules, le champ devient bi-ionisé ce qui, tout en ralentissant la précipitation ne l'empêche pas. Par suite de l'allure des lignes de force, la densité des gouttes captées est maximum près de l'anneau à la terre de sorte que la pellicule d'eau qui y est rattachée sera beaucoup plus épaisse que celle qui descend de la H. T. Les gouttelettes continuent à être captées.

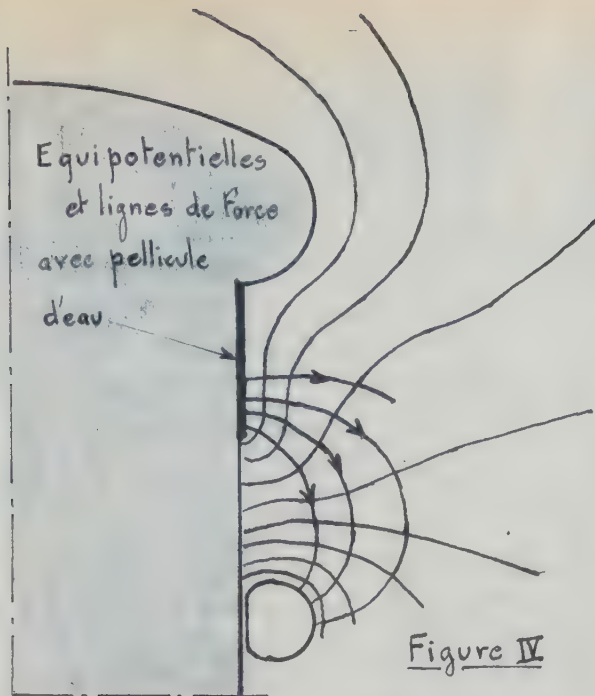
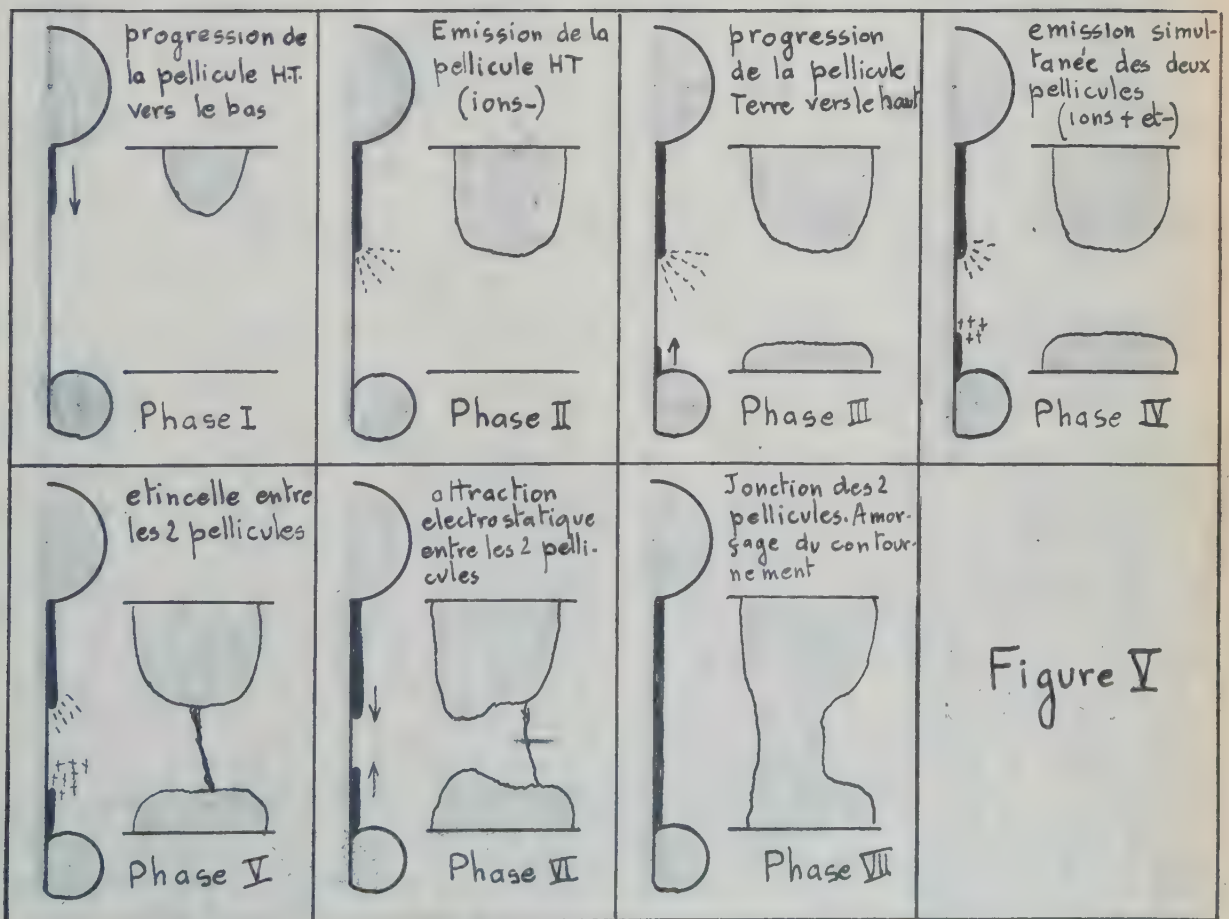


Figure IV



IV) AIGRETTES.

Quand on continue de faire croître la tension, des étincelles (décharges discrètes) prennent naissance entre les pellicules. Elles se produisent entre les points d'émissions $+$ et $-$ les plus intenses dans la couche d'air fortement ionisée. Ce phénomène nécessite déjà une grande densité de courant en ses points d'appui ce qui provoque une évaporation de l'eau. L'émission négative ne recevant plus de gouttelettes, la décharge va cheminer sur le bord de la pellicule en l'asséchant. Tandis que du côté terre, l'arc peut se maintenir en un seul point grâce à l'importance de la pellicule d'eau. La décharge se présente donc comme un petit arc dont la base est stable et dont l'extrémité supérieure recherche sans cesse le point d'appui le plus conducteur possible.

V) CAPTURE DES GOUTTES PENDANT LES EMISSIONS D'IONS.

Lorsque l'aigrette se produit entre les deux pellicules H. T. et terre, il ne se dépose pas de gouttelettes sur la portion de porcelaine directement intéressée par le phénomène. Mais l'aigrette est, en même temps qu'une série d'étincelles fugitives et limitées dans le temps, limitée dans l'espace. Elle ne s'étend que sur une largeur de 2 ou 3 cm. là où les conditions sont optima à son déclenchement. Des gouttes continuent donc à enrichir les pellicules d'eau, et notamment la pellicule reliée à la terre, aux endroits où les aigrettes ne se produisent pas. Une attraction électrostatique se produit entre les deux extrémités émettrices des pellicules, attraction d'autant plus forte que le champ deviendra plus intense. Finalement en un endroit privilégié, les deux pellicules vont se rejoindre formant un film liquide ininterrompu entre les deux électrodes.

VI) CONTOURNEMENT TOTAL.

Les décharges lumineuses deviennent plus intenses et débordent largement la zone comprise entre les deux émissions des bords des pellicules. En même temps qu'un film continu se forme entre les électrodes une décharge se fait plus brillante et se transforme en un arc fugitif qui suit le chemin le plus conducteur. Ce contournement total ne peut être entretenu avec notre source.

Par suite de l'évaporation produite par le passage du courant, le contournement qui suit immédiatement se fera sur une autre pellicule formée par l'arrivée des gouttelettes, là où les conditions seront favorables.

VII) ALLURE GENERALE D'UN CONTOURNEMENT EN COURANT CONTINU (Figure V).

D'après les formules établies, nous avons effectué différents calculs que nous avons comparé aux données expérimentales.

La captation débute pour un potentiel peu élevé sur une bande d'environ 2 cm. de largeur. Pour un brouillard de $0,960 \text{ g/m}^3$ de densité, il faut théoriquement (calcul effectué par approximations successives) quelques dizaines de secondes pour qu'une couche de gouttelettes puisse former une pellicule d'eau sur une longueur de 1 cm. au-dessous du chapeau. Si l'on fait croître progressivement la tension jusqu'à 15 KV en une minute par exemple, il faut attendre 2 minutes environ pour que la pellicule descende de 5 cm., ce qui est en accord avec l'expérience.

Le report du potentiel sur le film conducteur supérieur peut ainsi donner naissance à un champ de 5.000 V/cm. environ vers l'extrémité de la pellicule qui est suffisant, d'après MACKY, pour déclencher dans ce cas une émission négative.

Les gouttelettes qui sont repoussées vers l'anneau à la terre forment une pellicule de l'ordre de 1/2 cm. après quelques secondes (en accord avec l'expérience).

L'émission positive débute alors sur l'arête supérieure du film conducteur relié à la terre pour un champ un peu supérieur au précédent (pellicule négative).

Un phénomène lumineux d'aigrettes prend alors naissance entre les 2 pellicules. Les gouttes continuent cependant à être captées près des arêtes des pellicules. Finalement, il se produit un film conducteur par attraction électrostatique qui relie le chapeau H T à la bague à la terre. Un arc s'amorce alors entre la H T et la terre et provoque une ionisation thermique le long de son trajet. Il y a contournement.

VIII) **LE CONTOURNEMENT EN COURANT ALTERNATIF.**

Les deux électrodes jouent alternativement le rôle des électrodes précédentes, ce qui conduit qualitativement à la même succession de phénomènes lumineux. On observe donc l'émission lumineuse, les aigrettes et finalement le claquage comme plus haut.

CHAPITRE III

ESSAIS EN COURANT CONTINU

Nous avons opéré en courant continu une série d'essais afin d'étudier la variation de la tension d'amorçage en fonction de la longueur de contournement et de la densité de brouillard.

I) CONDUITE DES ESSAIS.

Les essais ont été effectués en fonction de la densité du brouillard pour 6 valeurs de masse d'eau condensée par unité de volume respectivement 0,96 – 1,88 – 2,47 – 3,31 – 4,75 et 6,12 g/m³.

Avant de commencer les essais, nous avons étudié quelles étaient les meilleures conditions pour lesquelles le contournement se reproduisait dans des limites très étroites. Nous sommes arrivés aux résultats suivants :

- Le brouillard doit être stable.
- L'isolateur doit être nettoyé après chaque série de mesures.
- Après lavage, il faut attendre deux minutes pour que l'isolateur ait repris son équilibre thermique avec l'air ambiant.
- La distance entre électrodes déterminée avec une précision du 1/2 ‰, doit être de 5 ‰ minimum (pour des valeurs inférieures, les dimensions des pièces métalliques perturbent fortement l'allure des équipotentielles).
- Les essais doivent se dérouler tous dans le même temps. La tension est élevée lentement (2 minutes pour aller de 0 à 30 KV).
- Pour une distance entre électrodes donnée et une densité de brouillard constante, nous effectuons 12 essais.

En effet, lors du premier contournement, il a fallu élever la tension jusqu'à obtention d'une pellicule continue. Pour le second, il n'est pas nécessaire d'atteindre la première valeur car il existe déjà des dépôts de gouttelettes différents qui préparent un chemin de contournement. Ceci se produit jusqu'au 6^e essai environ. Chaque claquage dessèche le film conducteur sur lequel il se produit. Par la suite, il faut reformer des pellicules ce qui demande une tension accrue puis, un équilibre se réalise entre l'arrivée des gouttes et leur disparition vers le 12^e essai.

II) RÉSULTATS.

Nous avons tracé les courbes de la tension de contournement en fonction de la distance entre bagues pour une densité de brouillard donnée (figure 6), puis en fonction de la densité de brouillard pour une distance fixe entre électrodes (figure 7).

1) Figure 6.

Nous avons porté pour chaque densité de brouillard les valeurs maxima et minima de tension de contournement en fonction de l'écartement des électrodes (entre 5 et 15 ‰). Entre ces limites, le phénomène est d'allure linéaire. En effet, les diverses phases de l'amorçage sont fonction du champ électrique de sorte qu'il se produit une similitude pour différents écartements d'électrodes.

2) Figure 7.

Les mêmes essais nous ont conduits à étudier pour une distance fixe entre électrodes,

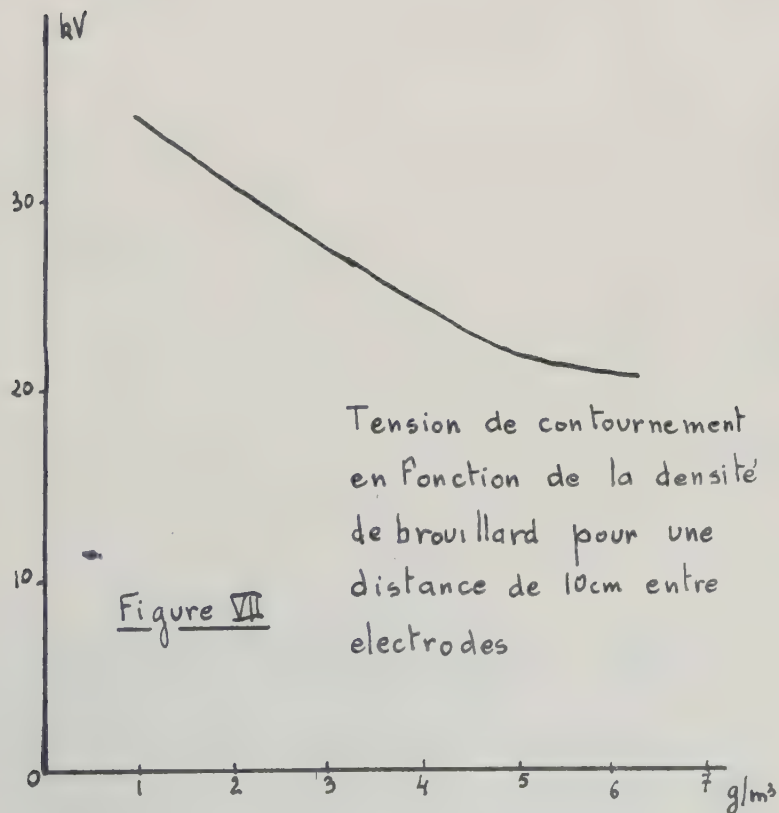
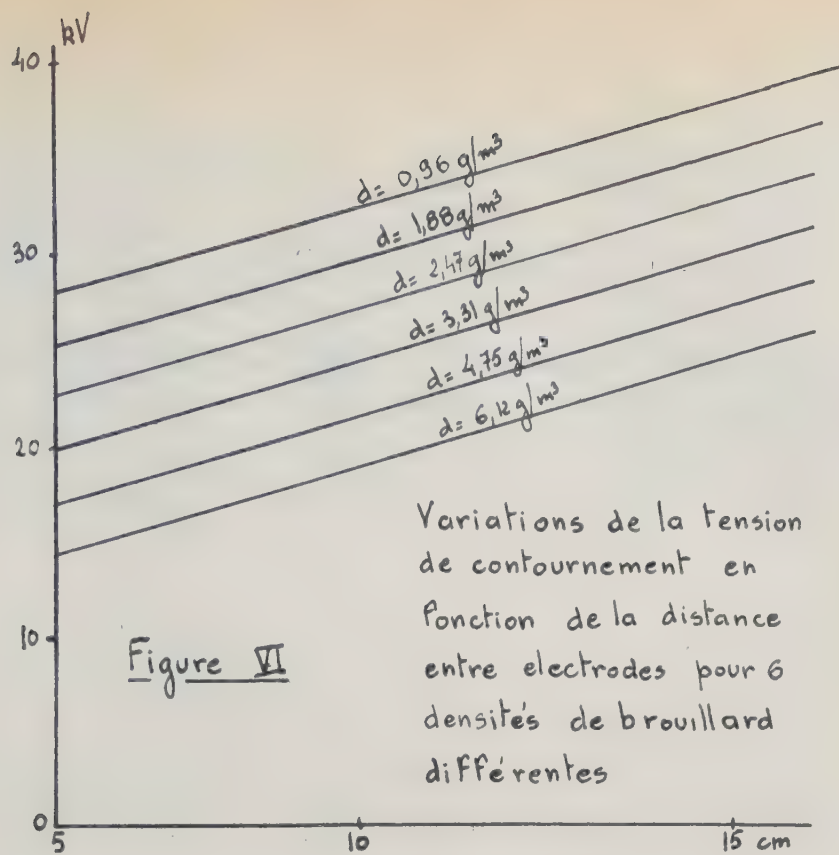
la variation de la tension de contournement en fonction de la densité du brouillard. On remarque :

a) Entre $0,96 \text{ g/m}^3$ et 3 g/m^3 , la tension de contournement varie en raison inverse de la masse d'eau condensée par unité de volume.

Comme nous avons toujours opéré en élevant la tension à vitesse constante, le dépôt de gouttelettes croît rapidement avec le temps et la densité du brouillard. Pour un brouillard de faible densité, la pellicule d'eau très mince s'évaporerait plus rapidement lors des passages des courants, qu'une pellicule formée par un brouillard très dense. Les chutes ohmiques varient en sens inverse de la densité de brouillard.

b) Au-dessus de 3 g/m^3 , la tension de contournement ne croît plus proportionnellement à la densité de brouillard. La courbe s'infléchit de plus en plus et semble même tendre vers une valeur constante au-delà de 7 g/m^3 .

Il se produit à partir de 3 g/m^3 un phénomène de saturation lorsque l'on élève la tension, le dépôt de gouttes devient très épais pour une grande densité de brouillard et les chutes ohmiques sont très petites. Si la densité est très grande, la chute ohmique est négligeable et la tension de contournement deviendra indépendante de la masse d'eau condensée par unité de volume.



CONCLUSION

Les essais effectués nous ont permis de mettre en évidence le rôle initial prépondérant du dépôt de gouttelettes neutres sur la porcelaine de l'isolateur. Leur distribution est étroitement liée au champ électrique. Les phénomènes de contournement dépendent en particulier de la chute ohmique.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) L. CABANES et L. DUVAL. - *Rapport d'exploitation sur un certain type d'incidents fugitifs sur les lignes de transport à très haute tension CIGRE. Rapport n° 217.*
- 2) Arnolfo PERNIER. - *Alcune considerazioni sul cosiddetto "Effeto del mattino" CIGRE. Rapport n° 231.*
- 3) P. SCHUEPP. - *Enquête sur l'isolement des lignes à H. T. dans des conditions atmosphériques défavorables. Rapport n° 234.*
- 4) D. ZANOBETTI et G. VISCHI. - *Le problème des isolateurs des lignes aériennes à H. T. installées en milieu défavorable. L'Energie E/ettrica Novembre 1952, p. 697-712.*
- 5) H. MEYER. - *Le défaut instantané à la terre dans les réseaux H. T. Elektrotechnische Zeitschrift 1^{er} Septembre 1952, p. 537-541.*
- 6) H. Von CRON, W. ESTORFF et H. LAPPLE. - *Le comportement des isolateurs à H. T. dont les surfaces sont soumises à diverses conditions CIGRE. Rapport n° 218.*
- 7) JS FORREST. - *The characteristics and performance in service of High Voltage porcelain insulators Journal L. E. E. Vol. 89 part. II - n° 7 Février 1942.*
 - 8) *L'isolateur H. T. considéré sous l'angle du problème des dépôts superficiels Elektrotechnische Zeitschrift 1^{er} Février 1952, p. 57-62.*
 - 9) *Influence des dépôts superficiels sur les tensions de contournement des isolateurs Hescho Mitt 70, 1933.*
 - 10) *Evolution d'une gouttelette d'eau chargée dans un nuage à température positive R. G. E. Mai 1953, p. 255-262.*
 - 11) *Influence de la charge électrique de l'obstacle dans le mécanisme de captation de particules en suspension dans un fluide en mouvement. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences 17 Juillet 1950, t. 231, p. 213.*
 - 12) *Captation de gouttelettes de brouillard par les lignes de transport d'énergie électrique à Haute Tension R. G. E. Mars 1953, p. 113-129.*

OUVRAGES DE BASE

- M. PAUTHENIER. Cours professé à la Faculté des Sciences de Paris.
- J. BRICARD. Physique des nuages P. U. F.
- J. J. THOMSON. Passage de l'électricité à travers les gaz Gauthier-Villars.

PHOTOGRAPHIES

PLANCHE I

- Photo n° 1 — Gouttelettes de brouillard captées sur fil d'araignée.
- Photo n° 2 — Gouttelettes de brouillard captées dans l'huile.
- Photo n° 3 — Impacteur en cascade.
- Photo n° 4 — Impact de gouttelettes sur le 1^{er} étage de l'impacteur en cascade.

PLANCHE II

- Photo n° 5 — Impact de gouttelettes sur le 2^e étage de l'impacteur en cascade.
- Photo n° 6 — Impact de gouttelettes sur le 3^e étage de l'impacteur en cascade.
- Photo n° 7 — Arc de contournement pour une distance de 8 cm entre électrodes.
- Photo n° 8 — Captation de gouttelettes près de la Haute Tension et près de la terre. Brouillard teinté au bleu de méthylène.
 - en A — Pellicule d'eau qui descend de la Haute Tension.
 - en B — Zone où débute l'ionisation négative.
 - en C — Pellicule d'eau qui remonte de la terre.
 - en D — Zone de début d'ionisation positive.

PLANCHE I



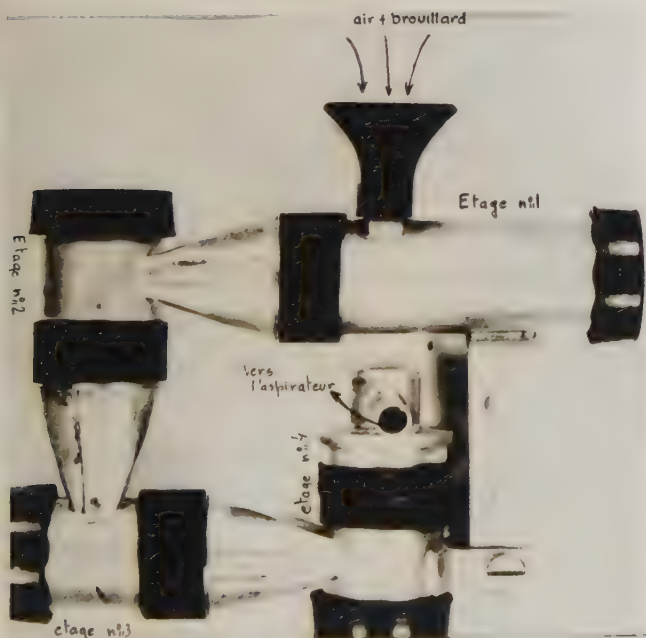
1

Echelle 0 20 40 60 80 100 μ

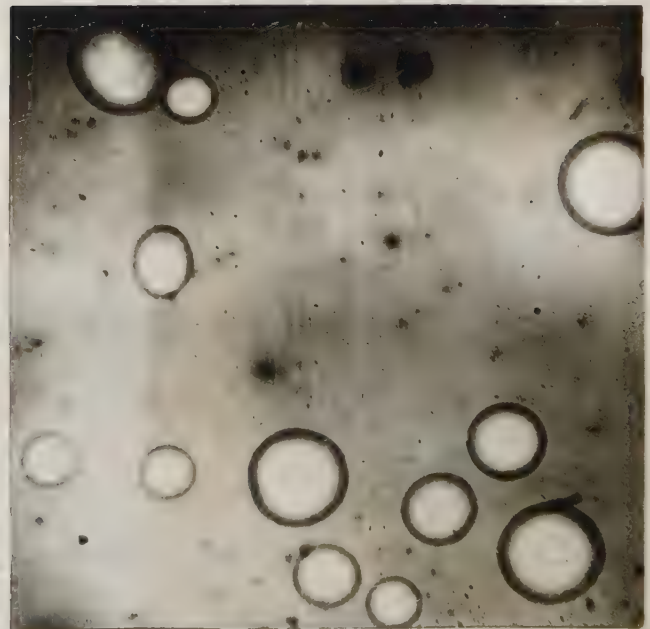


2

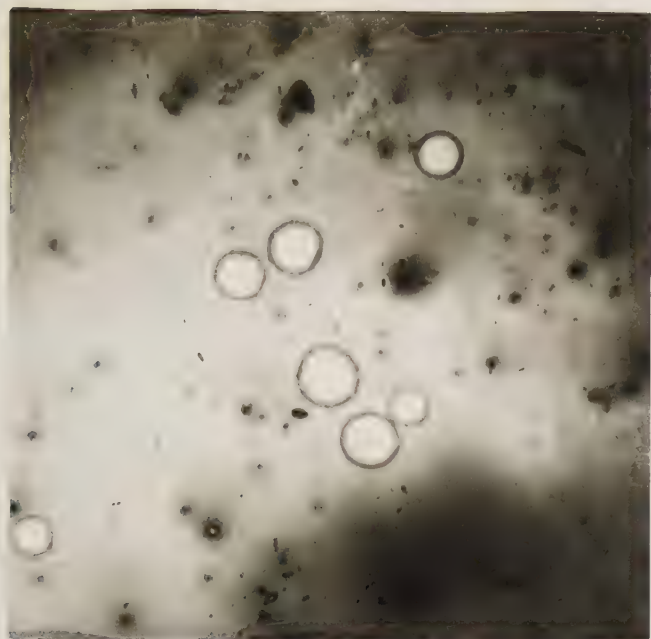
3



4

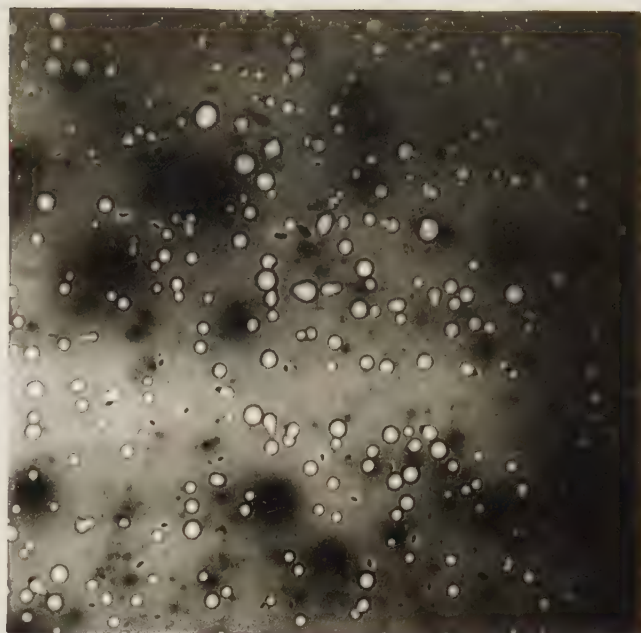


Echelle 0 10 20 30 40 50 μ



5

Echelle 0 10 20 30 40 50 μ m



6

7



8

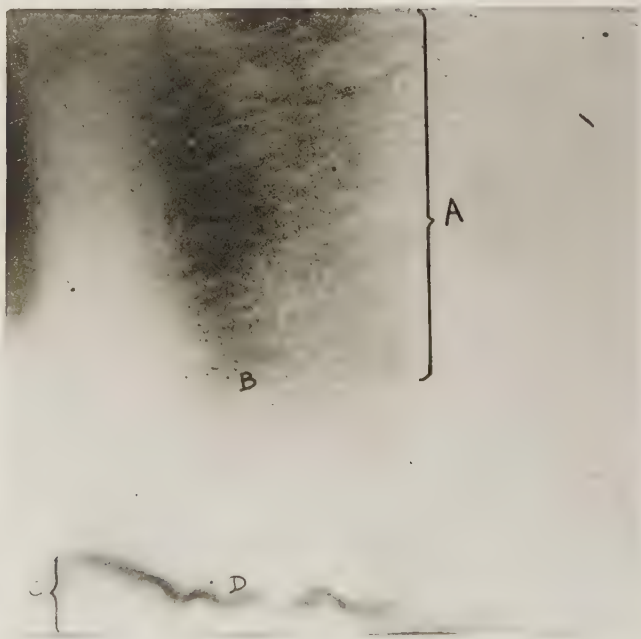


TABLE DES MATIÈRES

Résumé	<i>Page</i> 1
But des Essais	— 2
CHAPITRE I — Dispositifs expérimentaux	
A) Chambre à brouillard	— 3
B) Installation électrique	— 5
CHAPITRE II — Le phénomène de contournement en courant continu	
A) Phénomènes observés lors de la mise sous tension	— 6
B) Etude à l'aide du bleu de méthylène	— 6
C) Etude du contournement	— 7
CHAPITRE III — Essais en courant continu	
A) Conduite des Essais	— 11
B) Résultats	— 11
CONCLUSION	— 13
BIBLIOGRAPHIE	— 14
PHOTOGRAPHIES	— 15

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

" Mesure de l'humidité dans l'atmosphère."

Vu et approuvé :

Paris, le 7 Juin 1959.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. PERES

VU

et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

Jean SARRAILH

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen J. PERES

G. JULIA	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure	SOLEILLET	T Physique
FOCH	T Mécan. physique et expérimentale	FORTIER	T Mécanique expérim. des fluides
DE BROGLIE	T Théories physiques	DANJON	T Astronomie
PRENANT	T Anatomie et Histol. comparées	LAPORTE	T Physique générale et radioactivité
PERES	T Mécan. des Fluides et applications	JANET	T Mécanique analytique et Mécanique céleste
M. CURIE	T Physique (S. P. C. N.)	PETIT	T Biologie maritime
BARRABÉ	T Géol. struct. et Géol. appliquée	QUENEY	T Météorologie et dynamique atmosphérique
J. BOURCART	T Géogr. physique et Géol. dynamique	GALLIEN	T Embryologie
PLANTEFOL	T Botanique	EICHHORN	T Biologie végétale (S. P. C. N.)
GRASSÉ	T Evolution des êtres organisés	DE CUGNAC	T Biologie végétale (S. P. C. N.)
PREVOST	T Chimie organique	Mlle CAUCHOIS	T Chimie Physique
BOULIGAND	T Application de l'analyse à la Géométrie	THELLIER	T Physique du Globe
CHAUDRON	T Chimie appliquée	L'HERITIER	T Génétique
WYART	T Minéralogie	GRIVET	T Radioélectricité
TEISSIER	T Zoologie	PONCIN	T Mécanique Générale
MANGENOT	T Biol. Végétale	DUBREIL	T Arithmétique et théorie des nombres
P. AUGER	T Physique quantique et relativité	QUELET	T Chimie organique
MONNIER	T Physiol. générale	CAGNIARD	T Géophysique appliquée
PIVETEAU	T Paléontologie	CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire
ROCARD	T Physique (E. N. S.)	CUVILLIER	T Géol. structurale et Géologie appliquée
H. CARTAN	T Mathématiques (E. N. S.)	JUNG	T Pétrographie
LAFFITTE	T Chimie générale	TRILLAT	T Microscopie et diffraction électronique
FAVARD	T Géométrie supérieure	WIEMANN	T Chimie organique et structurale
COULOMB	T Physique du Globe	JACQUINOT	T Spectroscopie et physique céleste
Mlle COUSIN	T Biologie animale (S. P. C. N.)	VASSY	T Physique de l'Atmosphère
CHRETIEN	T Chimie minérale	DESTOUCHES	T Théories physiques
P. DRACH	T Zoologie	M. PRUVOST	T Géologie
KASTLER	T Physique (E. N. S.)	AMIEL	T Chimie générale (P. C. B.)
EPHRUSSI	T Génétique	HOCART	T Minéralogie
WURMSER	T Biologie physicochimique	J. P. MATHIEU	T Physique (P. C. B.)
RIVIÈRE	T Géologie (S. P. C. N.)	COUTEAUX	T Biol. Animale (P. C. B.)
GAUTHERET	T Biol. végétale (P. C. B.)	MAY	T Biol. Animale (P. C. B.)
LUCAS	T Recherches physiques		
A. THOMAS	T Biologie cellulaire		
ARNULF	T Optique appliquée		
M. MORAND	T Enseignement de Physique		

CHOQUET	T	Calcul différentiel et Intégral
FELDMANN	T	Biologie (P. C. B.)
GUINIER	T	Physique des solides
JOST	T	Physiol. comparée
FORTET	T	Calcul des probabilités
SCHWARTZ	T	Calcul différentiel et Intégral
CHOUARD	T	Physiol. Végétale
MALAVARD	T	Aviation
BRELOT	T	Calcul différentiel
NORMANT	T	Chimie organique
BENARD	T	Chimie minérale
BUVAT	T	Botanique (E. N. S.)
DUGUE	T	Statistiques mathém.
GELESO	T	Chimie (S. P. C. N.)
SOULAIRAC	T	Psychophysiologie
ULRICH	T	Physiologie Végétale
MARECHAL	T	Optique théorique et appliquée
KIRRMANN	T	Théories chimiques
CHADEFAUD	T	Botanique
DESTRIAU	T	Physique (M. P. C.)
Mlle LE BRETON	T	Physiol. générale
SALEM	T	Mathématiques Générales
LELONG	T	Mathématiques Générales
DEVILLERS		Anatomie et Histologie comparées
EHRESMANN	T	Topologie algébrique
FRANÇON	T	Physique (S. P. C. N.)
GLANGEAUD	T	Géogr. physique et Géol. dynamique
GODEMENT	T	Mathématiques (M. P. C.)
PISOT	T	Calcul des probabil.
ROCH E.	T	Géologie
SCHATZMANN	T	Astrophysique
TERMIER	T	Paléontologie stratigraphique
ZAMANSKI	T	Mathématiques Génér.
LENNUIER		Physique (M. G. P.)
RIZET		Génétique
ROUTHIER		Géologie appliquée
Mme TONNELAT	T	Physique théorique
DIXMIER	T	Mathématiques (M. P. C.)
SOUCHAY	T	Chimie générale
AIGRAIN	T	Electrotechnique
BRUSSET		Chimie minérale
M. LEVY		Physique théorique
Mme CHAIX		Chimie biologique

Mme HUREL-PY		Biol. Végétale (P. C. B.)
PIAUX		Chimie (P. C. B.)
BRUN		Mécanique expérimentale des fluides
DEDERER	T	Chimie des substances organiques naturelles
Mme DUBREIL	T	Mathématiques
Mme LELONG	T	Mathématiques (E. N. S.)
BELLAIR	T	Géologie (S. P. C. N.)
COTTE	T	Physique (M. P. C.)
DUBOIS J. E.	T	Chimie (S. P. C. N.)
LAMOTTE		Zoologie (E. N. S.)
LE ROLLAND		Mécan. des fluides
MICHEL André	T	Chimie (S. P. C. N.)
OLMER	T	Energétique Générale
ROUAULT	T	Physique Générale
GAUTHIER	T	Méc. appliquée
BARCHEWITZ		Chimie Physique
BROSSEL		Physique atomique
BUSER		Biologie animale (P. C. B.)
CAMUS		Biologie Vég. (P. C. B.)
CASTAING		Physique Générale
CURIEN		Minéralogie et cristallographie
MOYSE		Physiologie Végétale
NOIROT		Evolution des êtres organisés
PANNETIER		Chimie (S. P. C. N.)
POSSOMPES		Biologie Animale (P. C. B.)
PULLMANN		Chimie Théorique
TEILLAC		Physique Nucléaire et Radioactivité
TONNELAT		Biol. physicochimique
VILLE		Econométrie
WILLEMART		Chimie (P. C. B.)
DODÉ	T	Chimie
FREYMANN	T	Physique (S. P. C. N.)
GUINOCHET	T	Biol. Vég. (ORSAY)
ROLLET	T	Chimie (P. C. B.)
Mlle JOSIEN	T	Chimie (P. C. B.)
CHEVALLEY	T	Géométrie Algébrique et théorie des groupes
ARNOULT	T	Physique (Orsay)
CHAPELLE	T	Physique (P. C. B.)
DELANGE	T	Mathématiques (Orsay)
DENY	T	Mathématiques (Orsay)
GERMAIN P.	T	Mécan. théor. des fluides
LUCAS G.	T	Géologie

Secrétaire Général..... C. MONIER

